

doi: 10.3788/lop47.040602

# 基于 LED 的紫外光通信系统研究

赵明<sup>1</sup> 肖沙里<sup>1</sup> 王玺<sup>1</sup> 施军<sup>1</sup> 黄睿<sup>1</sup> 姜蓉蓉<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup>重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400030)  
(<sup>2</sup>重庆工商大学实验与实验设备管理处, 重庆 400067)

**摘要** 针对现有基于低压汞蒸气灯“日盲”紫外光通信系统通信速率低、驱动电压高、光源响应速度慢、电光转换效率低和功耗过高等问题, 提出并设计了一套基于 LED 的“日盲”紫外光通信系统。该系统以深紫外 LED 作为光源, 用光电倍增管探测微弱光信号, 采用脉冲位置调制 (PPM) 技术和最大似然解调技术, 并用现场可编程门阵列完成了调制解调部分的设计与仿真。实验表明, 采用深紫外 LED 和 PPM 技术, 可以大幅度提高系统的通信速率、电光转换效率, 同时显著降低驱动电压和系统功耗。

**关键词** 光通信; 紫外光; 深紫外 LED; 脉冲位置调制

中图分类号 TN929.12 OCIS 060.4510 230.3670 文献标识码 A

## Ultraviolet Communication System Based on Deep LED

Zhao Ming<sup>1</sup> Xiao Shali<sup>1</sup> Wang Xi<sup>1</sup> Shi Jun<sup>1</sup> Huang Rui<sup>1</sup> Jiang Rongrong<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup>Key Laboratory of Optoelectronic Technologies and Systems, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, China)  
(<sup>2</sup>Laboratory & Facility Management Division, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China)

**Abstract** Considering the shortcomings of low data rate, low response speed, high driving voltage, low electrical to optical efficiency and excessive power of the existing short range ultraviolet (UV) communication system based on low pressure mercury lamps, an improved short-range UV communication system based on deep UV LED is proposed. This system takes pulse position modulation (PPM) and adaptive maximum likelihood demodulation as the key technologies. Photomultiplier tube is used to detect the weak optical signal. The scheme is simulated and realized by field programmable gate array. The simulation and experiment results indicate that the data rate and electrical to optical efficiency of the proposed system are improved greatly, and system power and driving voltage are also decreased.

**Key words** optical communication; ultraviolet; deep ultraviolet LED; pulse position modulation

## 1 引言

由于目前使用的通信方式保密性不高, 无法满足军事上的要求, 各国都在积极研究更隐蔽、更安全的通信方式, “日盲”紫外光通信就是其中一种。大气臭氧对 C 波段(200~280 nm)的紫外光有强烈的吸收作用, 只有少量此波段的紫外光到达地面, 因而具有“日盲”特性。另外, 地面上 C 波段紫外光源照射到空中的紫外光具有两个重要的特点: 首先, 照射到空中的紫外光会被大气散射吸收, 因而只有少量的光子可以被地面的探测器接收到, 信号微弱, 但干扰很少; 其次, C 波段紫外光在大气传输过程中会呈现指数衰减, 传输距离大多不超过几千米, 具有良好的保密性。在战争环境中, 当无线电、有线通信和光纤通信都不可用

收稿日期: 2009-04-16; 收到修改稿日期: 2009-07-01

作者简介: 赵明(1983—), 男, 硕士研究生, 主要从事紫外光通信方面的研究。E-mail: zhaomingcqu@live.cn

导师简介: 肖沙里(1953—), 男, 教授, 主要从事光学工程、X 射线、Gamma 射线等方面的研究。

E-mail: xiaoshali@cqu.edu.cn

时, 紫外光通信就会大展身手<sup>[1]</sup>。

早在 2002 年, 美国国防部高级研究计划局就开始资助采用发光二极管为光源的第二代紫外光通信系统的研究, 并且已经研制出了 275 nm 的紫外 LED。采用深紫外 LED 作光源可以提高系统稳定性, 而且相对于传统的低压汞蒸气灯和紫外激光器, 其结构更加紧凑, 更为重要的是可以大幅提高通信速率, 降低系统功耗<sup>[2]</sup>。近年来随着 LED 技术的快速发展, 毫瓦级的深紫外 LED 已经出现, 为光源的紫外光通信系统的研制提供了必要条件。

为了提高系统的通信速率、稳定性, 降低功耗, 根据 LED 的发光特性, 本文设计了一套基于 LED 的紫外光通信系统, 用现场可编程门阵列(FPGA)完成对调制解调部分设计与仿真, 并在室内成功进行了实验。

## 2 系统总体结构

### 2.1 基于 LED 的紫外光通信系统结构及工作原理

基于 LED 的紫外光通信系统主要由信号调制电路、LED 驱动电路、深紫外 LED、光电倍增管和解调电路等组成。深紫外 LED 和光电倍增管是系统的核心器件, 脉冲位置调制(PPM)技术为系统的关键技术。系统工作时由现场可编程门阵列将调制好的数字信号送给驱动电路驱动 LED, 发出的光脉冲经信道传输至光电倍增管, 然后经解调电路和 FPGA 解调输出, 如图 1 所示。

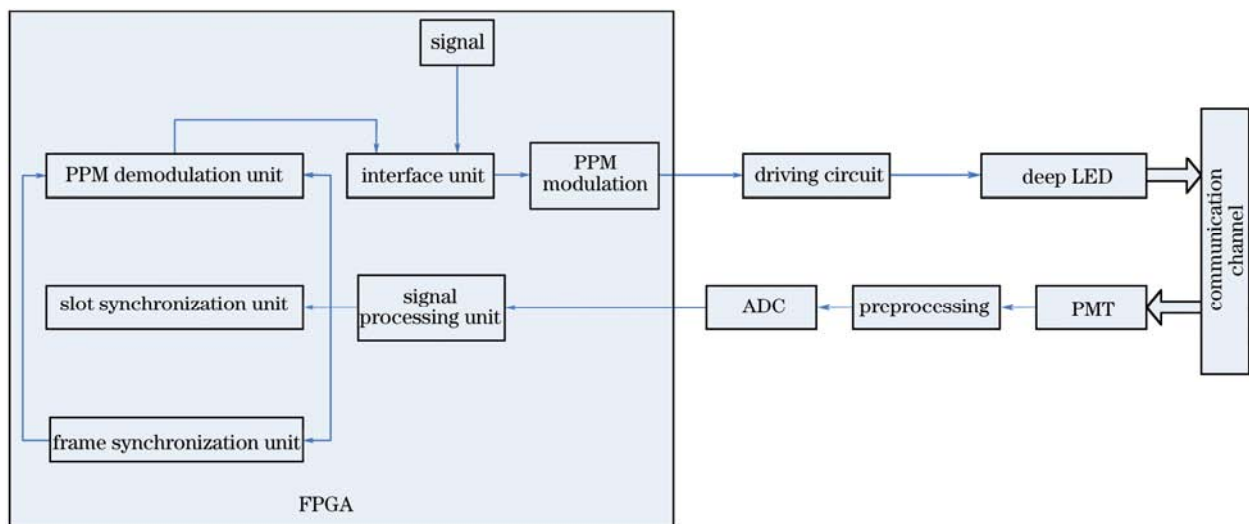


图 1 紫外光通信系统工作原理

Fig.1 Operation principle of ultraviolet communication system

### 2.2 紫外光源

第一代紫外光通信系统的光源大多采用气体放电灯, 根据气体放电灯的特性, 频移键控(FSK)是最为常用的调制方式。由于气体放电灯从一个频率状态到另一个频率状态会产生所谓的“过度频带”, 使两个频率之间的交替变化不能高速进行, 从而限制了通信速率。另外, 气体放电灯需要高压驱动, 电光转换效率不高, 响应速度慢, 严重制约了通信速率。深紫外 LED 的出现解决了上述难题: 1) LED 采用低压供电, 单管驱动电压为 1.5~3.5 V, 可操作性和安全性都有保障; 2) LED 功耗小, 消耗能量较同光效的白炽灯减少 80%; 3) LED 稳定性好, 工作  $10^5$  h 时光输出衰减为初始值的 50%; 4) LED 的响应时间短, 只有纳秒级, 这就为提高通信速率提供了必要条件<sup>[3]</sup>。由于地球大气的强烈吸收, 采用 253.7 nm 的紫外 LED 作为光源会大大提高系统的抗干扰性。

本文选用的光源为 S2684 系列的深紫外 LED, 单只电功率不超过 2 mW, 光功率为微瓦级。此款 LED 采用直流 5 V 供电, 暗电流较低, 发光准直性好, 在 LED 的前端还集成了滤光片, 发出的光波长在 252~256 nm,

波长误差不超过 2 nm。

### 2.3 光电探测器

对紫外光通信系统, 比较理想的光电探测器应该有大面积的有效光电反应探测区域、对深紫外光波段有良好的频谱响应以及极低的暗电流。光电二极管和光电倍增管是典型的光电子发射型(外光电效应)探测器件, 其主要特点是灵敏度高、稳定性好、响应速度快和噪声小, 是电流放大器件。光电二极管探测器具有量子效率高、噪声低、响应快、线性工作范围大、耗电少、体积小、寿命长、使用方便等优点, 但没有内置放大装置, 在可见光范围内灵敏度很低, 因而需要外置的功率放大器, 这就增加了噪声, 降低了信噪比, 因此光电二极管不适合用于微弱信号的探测。而光电倍增管有较大的光电反应探测区域, 是一种具有极高灵敏度和超快时间响应的光探测器件, 具有很高的电流增益, 其暗电流噪声比光电二极管低 $10^8$ 以上, 尤其适于探测微弱光信号。由于本文选用的光源的功率不超过 2 mW, 再加上发光效率的限制, 单位时间内只有少量的光子到达光电探测器, 在一定的距离内要探测这样微弱的信号, 一般采用光电倍增管作为光电探测器<sup>[4,5]</sup>。

光电倍增管是一种真空器件。它由光电发射阴极(光阴极)和聚焦电极、电子倍增极及电子收集极(阳极)等组成。由于采用了二次发射倍增系统, 光电倍增管在探测紫外、可见和近红外区的辐射能量的光电探测器中, 具有极高的灵敏度和极低的噪声比。另外, 光电倍增管还具有响应快速和阴极面积大等优点。决定光电倍增管响应波长的主要因素有窗材料和光阴极材料。为使 253.7 nm 的紫外光透过率最大, 可以选择合成石英、透紫玻璃和氟化镁(MgF)作为窗材料, 为把光电倍增管的波长响应峰值控制在 254 nm 左右, 选用的阴极材料为铯化铊(Cs-Te)<sup>[6]</sup>。根据以上两点, 选择日本滨松公司的光电倍增管, 它的光谱响应峰值为 254 nm, 响应波段为 160~320 nm, 非常适合于本文的紫外光通信系统。

另外为了将系统的噪声降到最低, 在光电倍增管的前端加“日盲”滤光片以消除可见光和红外光的影响。实验证明此滤光片对可见光的透过率为 $10^{-10}$ , 光波长为 900 nm 时为 $10^{-6}$ 。

### 2.4 LED 驱动

对 LED 的调制方式一般可分为模拟调制和数字调制, 由于系统采用 PPM 技术, 驱动电路需要提供 LED 工作范围内的“开”“关”电流, 所以数字调制方式最佳。LED 的驱动电路要使其的输出光功率大, 输出非线性失真小。电路布局中要考虑阻抗匹配、耦合方式的选择等问题。同时, PPM 方式是控制 LED 的“亮”“灭”, 而不是调节亮度的变化, 这就要求 LED 在工作时亮度应该恒定<sup>[7]</sup>。基于以上原因, 同时也为了简化驱动电路, 系统的驱动电路选用专用 LED 驱动芯片 DD331, 该芯片最大输出电流 1 A, 通过外接电阻和偏置电压的设置, 输出电流可以达到输入电流的 100 倍。

## 3 PPM 解调技术

### 3.1 PPM 技术及其仿真

PPM 是一种功率有效的通信方式, 与通断键控(OOK)等调制技术相比, 可降低光辐射平均功率的要求, 同时具有较强的抗干扰能力等优点。PPM 是一种正交位置调制, 在采用 PPM 的无线光通信系统中, 信息是由光脉冲所在的位置决定的。每  $M$  位的二进制信息被编码为一帧中某特定位置的一个光脉冲, 每个光脉冲位于  $2^M$  个时间位置之一上, 一个时隙的间隔为  $T_s$ ,  $2^M$  个时隙构成一个 PPM 帧。发射端在特定的时隙中将信号以光脉冲的形式发射出去, 接收端探测到光脉冲后判断其所属时隙, 然后恢复出信号, 图 2 为 16-PPM 示意图。

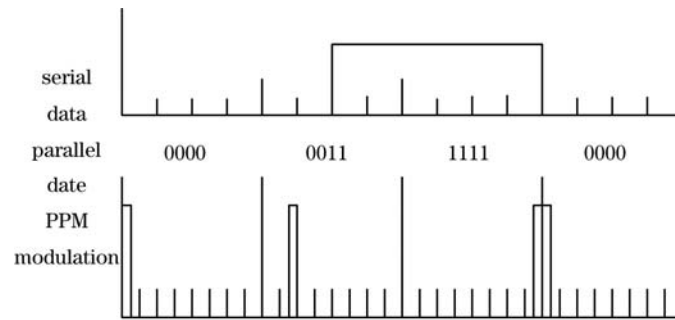


图 2 16-PPM 示意图  
Fig.2 Pictorial diagram of 16-PPM

采用FPGA实现调制的基本设计思路为：因输入数据是串行输入的，为使调制器能在一帧时间内传输4 bits的数据，故先对输入数据进行串并变换。由PPM的原理可知，当传输4 bits数据时，一帧时间内传信时隙应为16个，本文串并变换用到的时钟信号是时隙信号的4分频，每当输完4个数据时，为使并行数据能维持一帧时间使之与计数器产生的计数值进行比较，所以由锁存器控制输出并行数据。PPM信号产生的基本方法为通过计数器对时隙信号进行计数，当计数值等于输入的并行数据时，输出高电平“1”，否则输出低电平“0”，即通过输入数据控制脉冲的位置，其中在产生PPM信号时，为使时间上达到一致，由帧信号来控制计数器进行清零<sup>[7]</sup>。图3为FPGA调制流程图。用FPGA对16-PPM解调的仿真结果如图4和图5所示。

### 3.2 PPM 信号的判决

在光电检测信号判决点上，叠加在信号上的噪声是复杂的，但呈现可加性、趋于高斯白噪声分布且具有平稳性。在发射端、信道、接收端、检测电路的通信链路中，由于信号功率的涨落产生的围绕平均信号功率变化的附加噪声，以及光电探测器霰弹噪声和背景干扰噪声的影响，直接接收端信噪比表达式为

$$R_{SN} = \frac{\bar{P}_s}{(P_s + P_b)F \cdot 2B_c + \alpha \cdot \text{Var}(P_s)}, \quad (1)$$

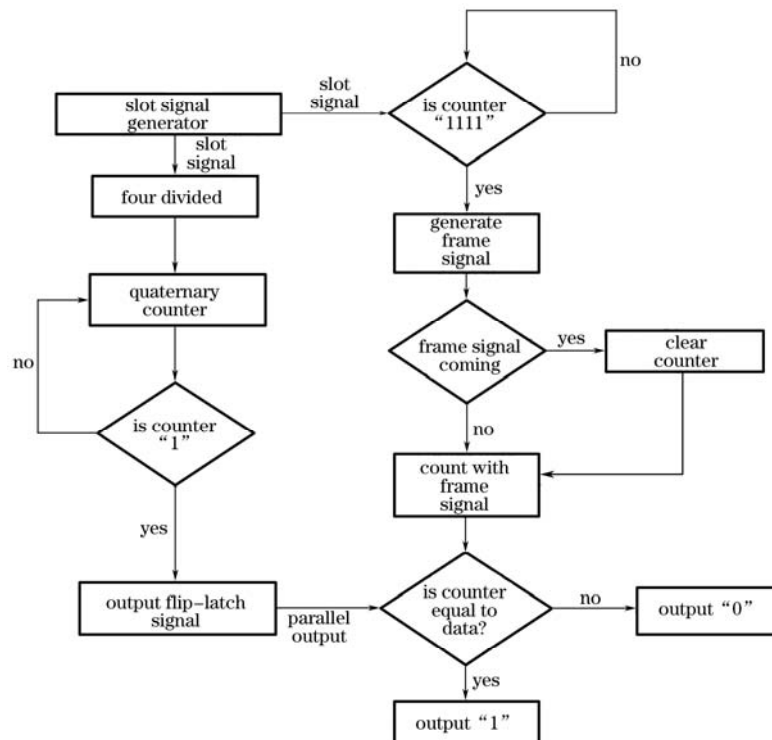


图 3 FPGA 调制流程图  
Fig.3 Flow chart of modulation using FPGA

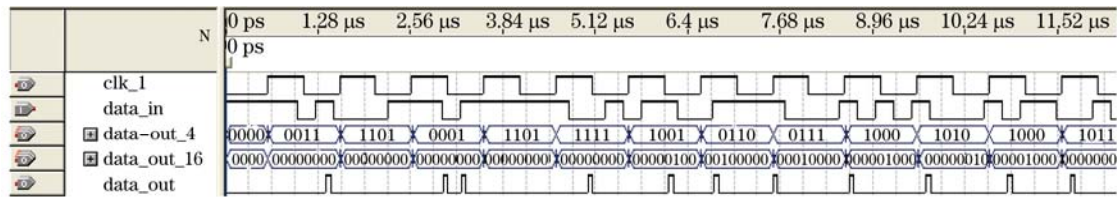


图 4 FPGA 调制仿真结果

Fig.4 Simulation of modulation using FPGA

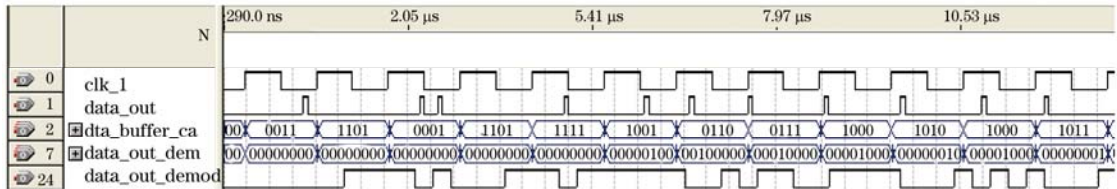


图 5 FPGA 解调仿真结果

Fig.5 Simulation of demodulation using FPGA

式中  $\alpha$  为大气信道的衰减损耗系数,  $P_s$  为探测器接收到的光功率,  $P_b$  为辐射光源的背景噪声功率,  $F$  为光电探测器的附加噪声因子,  $B_c$  为接收机滤光片的光学带宽,  $\text{Var}(\cdot)$  为样本方差。

基于以上分析的光电探测器的数学模型, 在PPM的紫外光通信系统中, 采用最大似然判决准则对光电探测器的信号进行判决分析。由于  $M$  个 PPM 时隙中特定时隙的光窄脉冲传输特定的 PPM 信息符号, 所以接收端需观测  $M$  个时隙的观测量才能得到一个 PPM 信息符号。  $M$  个观测量形成向量  $\mathbf{m}$ , 设每一个时隙长  $T_s$ , 由于各时隙在时间上是不重叠的, 故观测向量中  $M$  个分量都是相互独立的, 每个分量均由背景光和信号光强度之和决定。用  $\bar{n}_b$  表示  $T_s$  时间内背景光入射而使光电倍增管吸收的平均光子数,  $\bar{n}_s$  表示  $T_s$  时间内信号光入射而使光电探测器吸收的平均光子数, 则

$$p(x|\bar{n}_b) = \sum_{m=0}^{\infty} \phi(x, \mu_{mb}, \sigma_b^2) p(m|\bar{n}_b), \quad p(x|\bar{n}_b + \bar{n}_s) = \sum_{m=0}^{\infty} \phi(x, \mu_{msb}, \sigma_{sb}^2) p(m|\bar{n}_b + \bar{n}_s). \quad (2)$$

对  $x$  取对数似然函数后, 可以得到一个能作为足够判据的判决表达式:

$$\psi(x_q) = \frac{x_q^2}{2\sigma_b^2(1+x_q/\beta_b)} - \frac{(x_q - \bar{n}_s G)^2}{2\sigma_{sb}^2[1+(x_q - \bar{n}_s G)/\beta_{sb}]} + \frac{3}{2} \ln \left[ \frac{1+x_q/\beta_b}{1+(x_q - \bar{n}_s G)/\beta_{sb}} \right], \quad (3)$$

式中  $x$  的下标  $q$  为假定第  $q$  个时隙存在信号。经过数学证明,  $\psi(x_q)$  是单调增函数, 对 PPM 的判决可完全基于  $x_q$  的统计特性, 即光电探测器输出电子数目的统计特性。综上所述, PPM 的最大似然解调电路选择最大光电倍增管输出电子数目所在的时隙为相应的 PPM 信号<sup>[8]</sup>。

### 4 实验结果分析

本实验室早在 2007 年就自主开发研制了第一代紫外光通信系统, 以低压汞蒸气灯作为光源, 采用 2FSK 方式调制。在直视条件下, 可以在 200 m 的范围内以 9.6 kbit/s 的速率实现语音通信, 在靠近光源处可以实现非直视通信。但是由于低压汞蒸气灯的发光特性限制, 始终不能进一步提高通信速率。本实验室搭建的第二代基于 LED 的紫外光通信系统, 发射端采用单只深紫外 LED, 用 ALTERA 的 DE2 开发板做调制器; 接收端采用光电倍增管作为光电探测器, 并且将前端信号处理电路和 CPLD 解调电路做成 PCB 板, 以提高系统的集成度。实验中采用的是 4-PPM, 每一帧中的时隙数为 4 个, 每一帧可以传输 2 bits 的数据。所有的实验都是在实验室中完成且晚上与白天的实验数据差别不大, 白天的实验结果如表 1 所示。另外, 由于

串口的通信速率的限制, 直接用信号发生器对 LED 进行调制, DD331 的调制速率至少可以达到 7 Mbit/s。

表 1 实验结果  
Table 1 Experimental results

Environment	Moisture /%	Transmission data rate /k	Distance /m	Bit-error-rate /%
Clear day	35	1.2	10	<5
	35	2.4	1	<0.1
	35	115.2	0.3	<0.0001

实验表明: 采用 LED 作为光源, 能大幅度地提高系统的通信速率和稳定性, 降低系统功耗, 而且使结构更加紧凑、简洁。由于目前还没有出现大功率的深紫外 LED, 通信距离受到了一定的限制。一旦将来出现大功率的深紫外 LED, 将其做成阵列, 通信距离会大大增大, 并且可以实现真正意义上的非直视通信。

## 5 结 论

在第一代采用气体放电灯作为光源的紫外光通信系统的基础上, 设计并实现了采用 LED 作光源的紫外光通信系统, 此套系统功耗低、采用低电压供电、光源使用寿命长、便于携带、集成化程度高且其通信速率在原有的基础上得到了大幅度提高。

## 参 考 文 献

- Ni Guoqiang, Zhong Shengdong, Liu Liudi *et al.*. Study on ultraviolet communication through disengaged atmosphere[J]. *Opt. Technol.*, 2006, **26**(4): 297~303  
倪国强, 钟生东, 刘榴缙 等. 自由大气紫外光学通信的研究[J]. 光电技术, 2006, **26**(4): 297~303
- Andrew M. Siegel, Gary A. Shaw, Joshua Model. Short-range communication with ultraviolet LEDs[C]. *SPIE*, 2004, **5530**: 182~193
- Li Junwei. The Study of LED's Driver Circuit[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007. 10~11  
李军伟. LED的驱动电路的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2007. 10~11
- Tao Feng, Fei Xiong, Qing Ye *et al.*. Non-line-of-sight optical scattering communication based on solar-blind ultraviolet light[C]. *SPIE*, 2007, **6783**: 67833X
- Hu Guoyong. Study on Key Techniques of Visible Light Wireless Communication Based on LED[D]. Jinan: Jinan University: 2007. 22~29  
胡国永. 基于LED的可见光无线通信关键技术的研究[D]. 暨南: 暨南大学, 2007. 22~29
- Hamamatsu Electron tube Center. Photomultiplier Tubes[M]. Japan: Hamamatsu, 1998. 3~4
- Zhu Lejun, Zhang Jiangxin. Design of PPM modulation optical communication system based on FPGA[J]. *Opt. Commun. Technol.*, 2006, (12): 57~59  
朱乐君, 张江鑫. 基于FPGA的无线光通信PPM调制系统的设计[J]. 光通信技术, 2006, (12): 57~59
- Ma Huiping. Study of Demodulation Techniques in the Mobile Atmospheric Laser Communication System[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2003. 9~15  
马惠萍. 移动大气激光通信中的光调制解调技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2003. 9~15